УДК 531.383

МИКРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОРИЕНТАЦИИ

Т.Г. Нестеренко, И.В. Плотникова

Томский политехнический университет
Тел.: (382-2) 415-314

Рассматриваются проблемы разработки малогабаритных, быстродействующих, дешевых систем ориентации (СО). Представлена схема СО, построенная на основе двухкомпонентного микромеханического датчика угловой скорости. Рассмотрен принцип действия СО, проведен анализ динамики азимутального канала СО. Приведены результаты компьютерного моделирования азимутального канала СО.

Разработка перспективных систем ориентации (СО), навигации и управления движением объектов различного назначения связана с их миниатюризацией, снижением стоимости, энергопотребления и эксплуатационных расходов.

Применение новых типов гироскопов, такие как лазерные, волоконно-оптические, твердотельные позволяют уменьшить массогабаритные характеристики СО, но стоимость их не уменьшается, а чаще всего увеличивается, что является основным препятствием их применения.

Одним из перспективных направлений развития гироскопического приборостроения является разработка микромеханических инерциальных датчиков, в которых используются новые конструкционные материалы и технологии микромеханики [2, 3]. Такие датчики имеют малые габариты, стоимость и энергопотребление.

В работе рассматривается СО, построенная на микромеханическом инерциальном датчике.

СО решают задачу определения положения различных устройств и движущихся объектов относительно заданных базовых направлений. При ориентации в околоземном пространстве базовыми являются:

– направление полуденной линии;
– направление местной вертикали.

В качестве опорной системы координат (СК) наиболее часто используют географически ориентированную систему координат $O\xi\eta\zeta$ (рис. 1), начало которой связано с объектом и перемещается вместе с ним. Оси $O\xi$ и $O\eta$ лежат в плоскости горизонта, ось $O\xi$ направлена по касательной к меридиану на север, ось $O\zeta$ направлена по вертикали в зенит, ось $O\eta$ – на запад. Вектор $\overline{\Omega}_з$ угловой скорос-

ти вращения Земли раскладывается на две ортогональные составляющие

$$\Omega_{\Gamma} = \Omega_{\xi} = \Omega_{З}\cos\varphi; \ \Omega_{В} = \Omega_{\zeta} = \Omega_{З}\sin\varphi,$$

где φ, λ – географическая широта и долгота места нахождения объекта.

Ориентация объекта относительно опорной системы координат (СК) (рис. 2) определяется углами: α, γ, δ, где α – азимут объекта; γ, δ – углы отклонения объекта от плоскости горизонта, $OX_KY_KZ_K$ – система координат, жестко связанная с объектом.

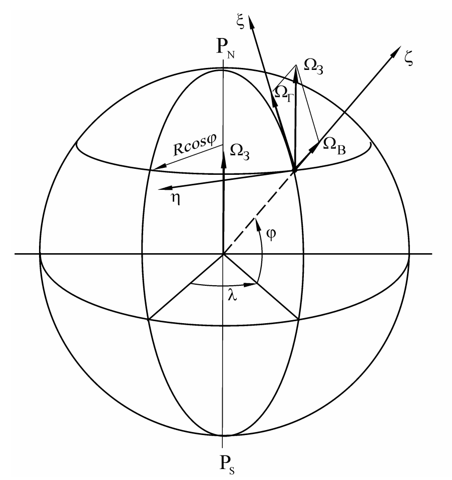


Рис. 1. *Земная система координат, ориентированная географически*

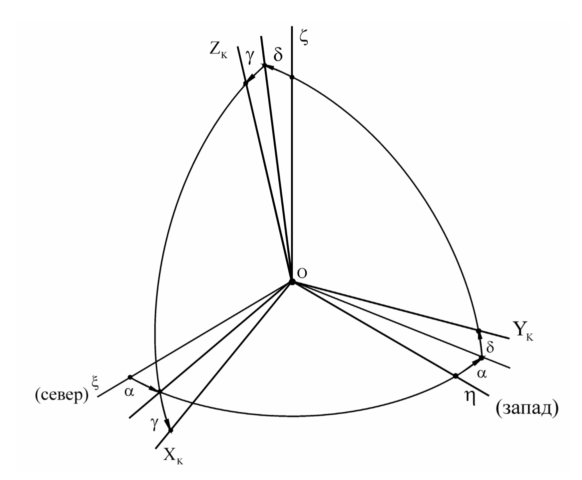


Рис. 2. *Системы координат, определяющая ориентацию объекта*

В рассматриваемой СО можно выделить два самостоятельных канала:

– азимутальный, измеряющий азимут α объекта (канал компасирования),
– горизонтальный, измеряющий углы γ, δ отклонения объекта от плоскости горизонта.

Горизонтальный канал реализован с помощью двухкоординатного физического маятника, особенности работы которого достаточно полно отражены в литературе. В азимутальном канале реализован принцип аналитического компасирования, основанный на измерении проекций угловой скорости вращения Земли на оси чувствительного элемента и расчете азимута по этой информации.

В работе рассматривается СО, построенная на микромеханическом инерциальном датчике. На рис. 3 представлена принципиальная схема микромеханической СО, которая содержит двухосный маятник – 2, выполняющий функцию геометрического построителя вертикали и установленный в кардановом подвесе – 3. На маятнике расположен чувствительный элемент (ЧЭ) – 1 азимутального модуля, с которого снимаются сигналы $\psi(t)$, $\vartheta(t)$, используемые для определения азимутального угла α.

На осях подвеса маятника установлены датчики угла – 4 и 5, с которых снимается информация об углах $\overline{\gamma}(t)$, $\overline{\delta}(t)$ отклонения объекта от плоскости горизонта.

Информация через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) – 6 поступает в вычислительное устройство – 7, которое:

– обеспечивает расчет углов ориентации α, γ, δ и географической широты φ;
– обеспечивает фильтрацию сигналов;
– определяет окончание переходного процесса колебаний маятника;
– вырабатывает сигналы управления вибровозбудителя;
– формирует сигналы управления системы резонансной настройки ЧЭ.

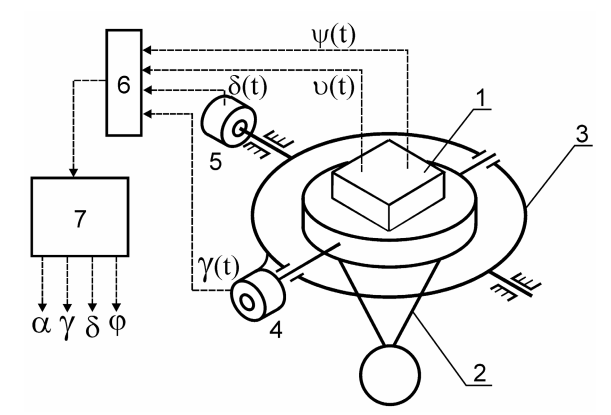


Рис. 3. *Принципиальная схема системы ориентации*

ЧЭ (рис. 4) азимутального канала СО содержит две инерционные массы – 1, 2, связанные с внутренней рамкой – 3 упругими элементами – 4. Вибропривод – 5 сообщает инерционным массам противофазные поступательные колебания по закону $z(t) = z_0\sin\omega t$. Внутренняя рамка – 3 связана упругими элементами – 6 с наружной рамкой – 7, которая установлена в корпусе также с помощью упругих элементов – 8. ЧЭ не имеет маятниковости, то есть центр масс его совпадает с точкой пересечения осей подвеса.

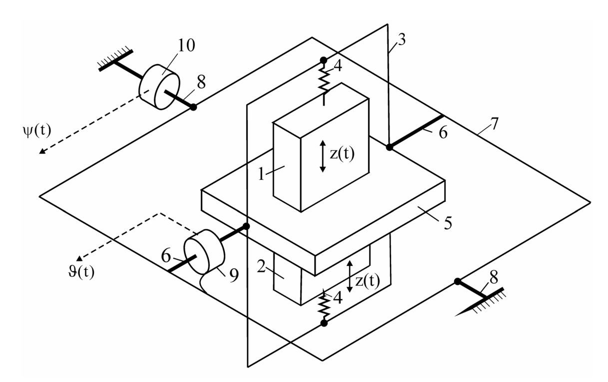


Рис. 4. *Принципиальная схема чувствительного элемента азимутального канала системы ориентации*

В результате вращения Земли и поступательных колебаний инерционных масс возникают силы Кориолиса, изменяющиеся по гармоническому закону, что приводит к появлению угловых колебаний $\psi(t)$, $\vartheta(t)$ ЧЭ вокруг внутренней и наружной осей подвеса.

Амплитуды этих колебаний измеряются датчиками – 9, 10, которые могут быть емкостными или пьезоэлектрическими, установленными в точках крепления упругих элементов – 6, 8.

Для определения алгоритмов расчета азимута α составим уравнения движения ЧЭ азимутального модуля, которые имеют следующий вид

$$
\begin{aligned}
&J_C\ddot{\psi} + D\dot{\vartheta}\Omega_B + \mu_1\dot{\psi} + c_1\psi = \\
&= -4m(\ell + z)\dot{z}\Omega_\Gamma\cos\alpha - \\
&-4m(\ell + z)\dot{z}\vartheta\Omega_B - 4m(\ell + z)\dot{z}\dot{\psi}; \\
&J_B\ddot{\vartheta} - D\dot{\psi}\Omega_B + \mu_2\dot{\vartheta} + c_2\vartheta = \\
&= -4m(\ell + z)\dot{z}\Omega_\Gamma\sin\alpha + \\
&+4m(\ell + z)\dot{z}\psi\Omega_B - 4m(\ell + z)\dot{z}\dot{\vartheta}; \\
&m\ddot{z} + \nu\dot{z} + kz = N(t),
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

где обозначено

$$
\begin{aligned}
&J_C = J_{Y1} + J_Y + 4m\ell^2 + 4m\ell z(t) = \\
&= J_{Y1} + J_Y + 4m[\ell + z(t)]\cdot\ell; \\
&J_B = J_X + 4m\ell^2 + 4m\ell z(t) = \\
&= J_X + 4m[\ell + z(t)]\cdot\ell \quad ; \\
&D = -J_Z + J_Y + J_X + 4m\ell^2 + 8m\ell z(t),
\end{aligned}
$$

J_X, J_Y, J_Z – главные центральные моменты инерции инерционного тела; $N(t) = N_0\sin\omega t$ – сила, создаваемая вибровозбудителем; c_1, c_2 – угловые жесткости упругих элементов – 6, 8; μ_1, μ_2 – коэффициенты сил вязкого трения; k – жесткость упругих элементов – 4, обеспечивающих поступательные колебания инерционных масс $m_1 = m_2 = m$; $\ell = \ell_1 = \ell_2$ расстояние от центра масс ЧЭ до центров масс колеблющихся масс.

Движение ЧЭ на неподвижном основании описывается дифференциальными уравнениями с периодическими коэффициентами, так как J_C, J_B, D имеют постоянную и переменную составляющие.

Первые два уравнения характеризуют движение ЧЭ вокруг его осей подвеса, третье уравнение определяет динамику вибропривода, который имеет достаточную мощность, поэтому члены второго порядка малости, через которые осуществляется его связь с угловым движением ЧЭ, не учитываются.

Нелинейные члены в уравнениях (1) существенно меньше линейных, поэтому для определения закона изменения координат $\psi(t)$, $\vartheta(t)$ воспользуемся методом последовательных приближений [1]. Решение системы (1) находим в виде рядов, расположенных по степеням малого параметра ε

$$
\begin{aligned}
\psi(t) &= \psi_0(t) + \varepsilon\psi_1(t) + \varepsilon^2\psi_2(t) + \dots \\
\vartheta(t) &= \vartheta_0(t) + \varepsilon\vartheta_1(t) + \varepsilon^2\vartheta_2(t) + \dots
\end{aligned}
$$

Общее решение ЧЭ азимутального модуля представляет собой колебания $\psi_0(t)$, $\vartheta_0(t)$ вокруг его осей подвеса с частотой ω вибровозбудителя, на которые накладываются более высокочастотные колебания $\psi_1(t)$, $\vartheta_1(t)$ ... с частотами, кратными частоте ω.

Амплитуды этих колебаний существенно меньше амплитуд основных информационных колебаний $\psi_0(t)$, $\vartheta_0(t)$, которые определяются как

$$
\begin{aligned}
\psi(t) &= A\cos\omega t + B\sin\omega t = \psi_0\sin(\omega t + \varphi_1) \\
\vartheta(t) &= M\cos\omega t + N\sin\omega t = \vartheta_0\sin(\omega t + \varphi_2),
\end{aligned}
$$

где амплитуды колебаний определяются как

$$
\begin{aligned}
&A = \frac{\Delta A}{\Delta}; \quad B = \frac{\Delta B}{\Delta}; \quad M = \frac{\Delta M}{\Delta}; \quad N = \frac{\Delta N}{\Delta}, \\
&\Delta = (J_C\omega^2 - c_1)^2(J_B\omega^2 - c_2)^2 - \\
&\quad -2H^2\omega^2(J_C\omega^2 - c_1)(J_B\omega^2 - c_2) + \\
&\quad +\mu^2\omega^2\left[(J_C\omega^2 - c_1)^2 + (J_B\omega^2 - c_2)^2\right] + \\
&\quad +\omega^4(H^2 + \mu^2)^2.
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
A = \frac{1}{\Delta}&\begin{bmatrix} (J_C\omega^2 - c_1)^2(J_B\omega^2 - c_2)^2 - \\ -H^2\omega^2(J_C\omega^2 - c_1) + \\ +\mu^2\omega^2(J_C\omega^2 - c_1) \end{bmatrix} F_1\cos\alpha - \\
&-\frac{1}{\Delta}H\mu\omega^2\begin{bmatrix} (J_C\omega^2 - c_1)(J_B\omega^2 - c_2) + \\ +(J_C\omega^2 - c_1) \end{bmatrix} F_1\sin\alpha
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
B = -\frac{1}{\Delta}\mu\omega&\begin{bmatrix} (J_B\omega^2 + c_2)^2 - \\ -\mu\omega^3(H^2 - \mu^2) \end{bmatrix} F_1\cos\alpha - \\
-\frac{1}{\Delta}&\begin{bmatrix} H\omega(J_C\omega^2 - c_1)(J_B\omega^2 - c_2) - \\ -H\omega^3(H^2 - \mu^2) \end{bmatrix} F_1\sin\alpha,
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
M = \frac{1}{\Delta}&\begin{bmatrix} H\mu\omega^2(J_C\omega^2 - c_1)\times \\ \times(J_B\omega^2 - c_2) + (J_C\omega^2 - c_1) \end{bmatrix} F_1\cos\alpha + \\
+\frac{1}{\Delta}&\begin{bmatrix} (J_C\omega^2 - c_1)(J_B\omega^2 - c_2) - \\ -H^2\omega^2\begin{bmatrix} (J_C\omega^2 - c_1) + \\ +\mu^2\omega^2(J_B\omega^2 - c_2) \end{bmatrix} \end{bmatrix} F_1\sin\alpha,
\end{aligned}
$$

$$N = \frac{1}{\Delta}\left[\begin{matrix} H\omega(J_C\omega^2 - c_1)\times \\ \times(J_B\omega^2 - c_2) - \omega^2(H^2 - \mu^2) \end{matrix}\right] F_1 \cos\alpha - \\ - \frac{1}{\Delta}\left[\mu\omega(J_C\omega^2 - c_1)^2 - \omega^2(H^2 + \mu^2)\right] F_1 \sin\alpha, \quad (2)$$

φ_1, φ_2 – сдвиги фаз между колебаниями вибропривода и ЧЭ.

Кроме того, имеются смещения ψ_C, ϑ_C положения динамического равновесия колебаний ЧЭ на постоянные величины, что обусловлено наличием нелинейных членов в уравнениях (1)

$$\psi_C = \frac{2m\ell z_0\omega(2\ell\omega A + \ell\Omega_B N - z_0\Omega_\Gamma \cos\alpha)}{c_1},$$

$$\vartheta_C = \frac{2m\ell z_0\omega(2\ell\omega B + \ell\Omega_B M - z_0\Omega_\Gamma \sin\alpha)}{c_2}.$$

Как видно из выражений (2), информация об азимуте объекта содержится в амплитудах A, B, M, N колебаний ЧЭ с частотой ω, все остальные сигналы являются помехами. Силы Кориолиса, вызывающие колебания ЧЭ вокруг его осей подвеса, малы, соответственно малы и амплитуды колебаний ЧЭ. Для их увеличения необходимо осуществлять резонансную настройку системы, то есть параметры ЧЭ выбираются таким образом, чтобы все собственные частоты ЧЭ были равны между собой и равны частоте ω вибровозбуждения инерционных масс.

При выполнении резонансной настройки азимут можно рассчитать по выражению

$$\alpha_p = \pi k \pm \operatorname{arctg}\frac{\mu\vartheta_0 - H\psi_0}{H\vartheta_0 + \mu\psi_0}$$

где k=0, 1, 2 определяется в зависимости от величины фазового сдвига между колебаниями ЧЭ вокруг его осей подвеса.

На рис. 5, 6 представлены результаты компьютерного моделирования движения ЧЭ в среде MathLab.

Высокая добротность колебательной системы может быть достигнута только при малой величине коэффициента сил вязкого трения, для чего осуществляется вакуумирование ЧЭ.

Однако, при уменьшении сил вязкого трения в ЧЭ возможно появление параметрического резонанса (рис. 5). Таким образом, существует критическое значение коэффициента сил вязкого трения $\mu_{кр}$, при котором возникает неустойчивый режим. Увеличение демпфирования обеспечивает устойчивые колебания ЧЭ, но приводит к уменьшению амплитуды полезного сигнала.

Так как азимут рассчитывается по амплитудам колебаний ЧЭ с частотой ω, то все остальные сигналы будут вызывать погрешности $\Delta\alpha_P$ определения азимута. Для их устранения используют полосовые фильтры, настроенные на частоту ω. На рис. 6 видно, что на выходе полосовых фильтров остаются только полезные информационные сигналы $\psi_0(t)$, $\vartheta_0(t)$, по которым рассчитывается азимут α. Наличие АЦП приводит к появлению погрешности квантования $\Delta\alpha_{P1}$, которая уменьшается при увеличении разрядности АЦП.

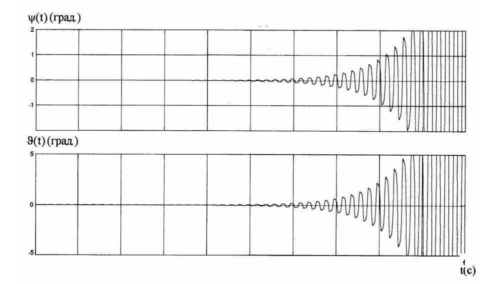


Рис. 5. *Параметрический резонанс ЧЭ*

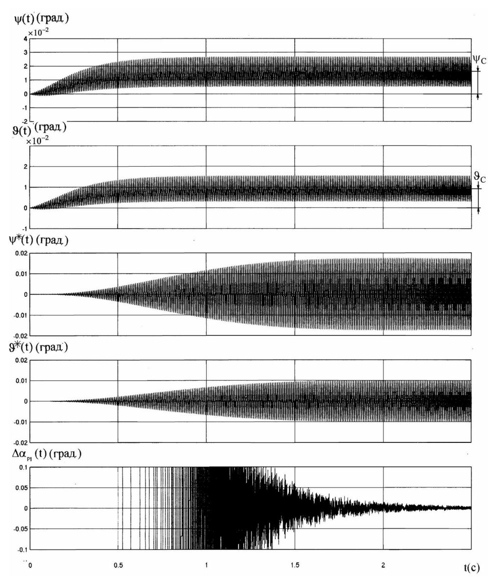


Рис. 6. *Характеристики ЧЭ с АЦП с использованием полосовых фильтров и без них*

Таким образом, применение микромеханического ЧЭ позволяет получать время готовности прибора доли или единицы секунд (рис. 6) при сверхмалых габаритах, низкой стоимости и достаточно высокой точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вибрации в технике: Справочник. – Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / Под. ред. И.И. Блехмана. – М.: Машиностроение, 1979. – 351 с.
2. Евстифеев Н.Н. Состояние разработок и перспективы развития микромеханических гироскопов // Навигация и управление движением: Сб. докл. II Научно-техн. конф. молодых ученых. – СПб., 2000. – С. 54–69.
3. Пешехонов В.Г. Микромеханические гироскопические приборы и задачи навигации // Гироскопия и навигация. – 1996. – № 3. – С. 129–136.